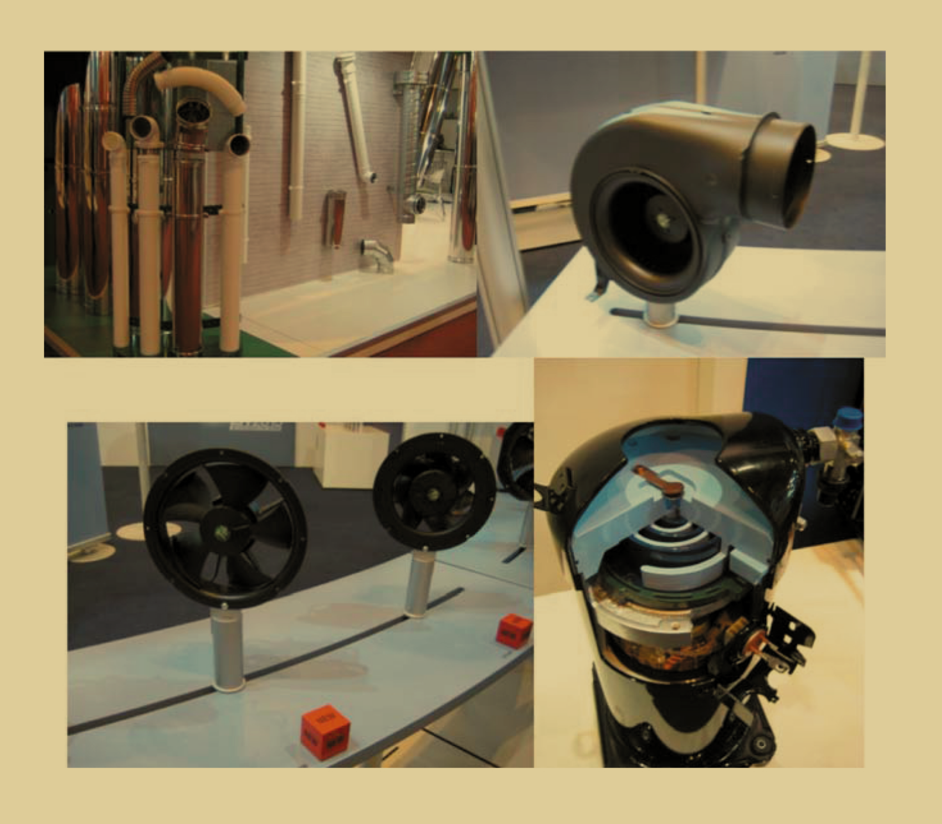
GUÍA PARA LA ASIGNATURA DE
INSTALACIONES Y SERVICIOS TÉCNICOS
(0)

HIDRÁULICA Y AERÁULICA

por

PILAR OTEIZA SANJOSÉ



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-84-01

GUÍA PARA LA ASIGNATURA DE
INSTALACIONES Y SERVICIOS TÉCNICOS
(0)

HIDRÁULICA Y AERÁULICA

por

PILAR OTEIZA SANJOSÉ

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-84-01

C U A D E R N O S
D E L I N S T I T U T O
J U A N D E H E R R E R A

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

TEMAS

1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN
0 VARIOS

Guía para la asignatura de Instalaciones y servicios técnicos (0). Hidráulica y aeráulica.
© 2011 Pilar Oteiza Sanjosé.
Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestión y portada: Almudena Gil Sancho.
CUADERNO 323.01 / 2-84-01
ISBN-13 (obra completa): 978-84-9728-358-8
ISBN-13: 978-84-9728-359-5
Depósito Legal: M-35155-2011

ÍNDICE

1. HIDRÁULICA Y AERÁULICA 1

1.1. Ecuación de continuidad y teorema de Bernoulli 1

1.2. Principio de la conservación de la energía aplicada a fluidos reales 2

1.3. Alturas de presión 5

2. MÁQUINAS DE FLUIDOS 6

2.1. **Bombas** 7

2.1.1. Tipos de bombas 7

2.1.2. Potencia, Φ,y rendimiento, η, de una bomba 8

2.1.3. Funcionamiento y caracterización de las bombas 9

2.1.4. Selección de una bomba 10

2.2. **Ventiladores** 11

2.2.1. Curva característica, potencia y rendimiento 12

2.2.2. Flujo de aire en conductos: presión estática y presión dinámica 12

2.2.3. Extracción e impulsión 12

2.2.4. Selección de ventiladores 14

2.3. **Compresores** 16

2.3.1. Compresores VRV 16

3. CIRCUITOS HIDRÁULICOS 17

3.1. Elementos de un circuito 18

3.2. Especificaciones básicas de los elementos del circuito 19

3.3. Energía de flujo y equilibrado de circuitos hidráulicos 20

3.4. Equilibrado en ramales de circuitos cerrados 22

APÉNDICE Diagrama de Moody 23

1. HIDRÁULICA Y AERÁULICA **parte de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento del aire en conductos o en contacto con superficies**

El *agua* y el *aire* además de suministro vital para la actividad humana son el elemento vehicular indispensable en gran parte de las instalaciones de la edificación; serán utilizados en las instalaciones de la edificación como portadores de calor/frío, para el transporte de desechos o, más importante, para su consumo directo.

Consideraremos que el *agua* y también, bajo ciertas condiciones el *aire*, son fluidos incompresibles a los que aplicamos la mecánica de los fluidos para el estudio de su movimiento y transporte; será absolutamente necesario recordar y tener vigente:

- Composición, propiedades y magnitudes que los definen.
- Conceptos, leyes, magnitudes y propiedades que rigen su movimiento, identificando:
    - Por dónde se mueven: *tuberías y conductos*
    - Dispositivos que les transfieren energía:
        - para producir su movimiento: *bombas y ventiladores*
        - para producir su cambio de temperatura: *calderas y enfriadoras*
        - para producir ambos: *compresores*
    - Elementos accesorios: *válvulas, filtros, depósitos*
    - Unidades terminales:
        - emisores de calor/frío, intercambiadores, baterías de enfriamiento, …
        - puntos de agua fría, de agua caliente sanitaria, rociadores, …
        - puntos de desagüe y saneamiento, …

Y, aunque se ha estudiado repetidamente en otras asignaturas, aquí vamos a precisar el enfoque de algunos aspectos teóricos dejando como trabajo personal la ampliación de conocimientos con elementos de consulta en los Apuntes de Instalaciones del profesor Rubio Requena.

1.1. Ecuación de continuidad y teorema de Bernoulli

La Dinámica de Fluidos es tradicionalmente estudiada utilizando la ecuación de Bernoulli

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \qquad (1.1)$$

aplicable sólo cuando el régimen de flujo es estacionario: ***Q= cte*** $\Rightarrow$ $A_1 v_1 = A_2 v_2$
Aunque sólo es válida:

- para fluidos incompresibles
- en tramos donde no haya dispositivos mecánicos que aporten o retiren energía
- sin que se produzca fricción ni turbulencias entre el fluido y los conductos, válvulas y accesorios del sistema
- sin que pueda haber transferencia de calor entre el sistema y el exterior

En consecuencia: *ninguna instalación, en edificación, puede ser estudiada aplicando estas hipótesis y esta ecuación*.

Para el cálculo de las *instalaciones reales* por las que circulan *fluidos reales* utilizaremos el Principio de la Conservación de la Energía; y veremos que en los casos específicos de manejo de agua y de aire, en las condiciones de presión, velocidad y temperatura habituales en edificación la forma final de este principio es muy similar a la ecuación de Bernoulli, por ello es de utilidad todo lo estudiado para fluidos perfectos.

1.2 Principio de conservación de la energía aplicado a fluidos reales

La aplicación del Principio *a los fluidos en circulación* se hace considerando que los estados inicial y final del sistema son, aquí, dos puntos cualesquiera de la instalación. El primer punto -en el sentido de flujo- corresponde con el estado inicial y el segundo con el estado final. El balance de energía, en el paso del estado 1 al 2, debe cumplir:

$$\Delta E_{Total} = Q - W \qquad (1.2)$$

E= energía del sistema Q=Calor ganado por el sistema, W=Trabajo realizado por el sistema

Podemos tener dos tipos de sistemas o volúmenes de control:

- *Sistema cerrado*: únicamente se intercambia energía con el entorno, *no hay acción mecánica, transferencia de masa, a través de la frontera;* por tanto, los intercambios de calor y trabajo con el exterior hacen variar, únicamente, la energía interna del sistema; de forma que se cumple:

$$\Delta U = Q - W$$

- *Sistema abierto*: además de intercambiar calor y trabajo con el exterior también *se intercambia masa*; y la ley de la Conservación de la Energía debe incluir la energía mecánica asociada a la masa transferida a través del sistema, de *(1.2.):*

$$\Delta(H + E_{cinética} + E_{potencial}) = Q - W \qquad \Rightarrow \qquad \Delta H + \tfrac{1}{2} m\Delta v^2 + mg\Delta z + W - Q = 0$$

  - *El balance de energía para una volumen, de masa unitaria, que recorra el sistema, considerando régimen estacionario, masa constante, será:*

$$\Delta h + \tfrac{1}{2} \Delta v^2 + g\Delta z + w - q = 0$$

– Recordando que: *h = u + pv; y que para fluidos incompresibles, Δu= 0:*

$$\Delta p/\rho + \tfrac{1}{2}\,\Delta v^2 + g\Delta z + w - q = 0$$

Finalmente -como para que fluya el trabajo se hace sobre el sistema y el calor es cedido por el sistema al exterior- por convenio w y q son negativos:

$$\boldsymbol{\Delta p/\rho + \tfrac{1}{2}\,\Delta v^2 + g\Delta z + q - w = 0} \qquad (1.3)$$

En definitiva, ***en un sistema por el que se transporta un fluido incompresible en régimen estacionario: se mantiene constante la suma de la energía mecánica específica del fluido con el trabajo realizado sobre cada unidad de masa y el calor desprendido por el sistema.***

Formas alternativas habituales de esta expresión, entre dos puntos de un sistema, son:

$$p_1 + z_1\gamma + \rho\frac{v_1^2}{2} + w = p_2 + z_2\gamma + \rho\frac{v_2^2}{2} + h_f$$ *Utilizando Pa como unidad de medida*

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + w = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$ *Utilizando N.m/N* como unidad de medida*

** N.m/N expresa la energía específica: energía por unidad de peso.*
Como veremos después, en la práctica se reduce la unidad de medida anterior eliminando N y, en consecuencia, expresándose en metros: correspondiendo a una altura.

Las variables que intervienen en las ecuaciones anteriores son de lectura directa en cualquier punto del sistema a excepción de $\boldsymbol{w}$ y $\boldsymbol{h_f}$

- El **TRABAJO**, ***w***, realizado sobre el sistema corresponderá a las bombas, ventiladores y compresores que mueven el fluido. Se corresponde con la potencia desarrollada por el equipo, durante el tiempo que éste esté en funcionamiento, afectado por el rendimiento del equipo al manejar el fluido. Habitualmente son equipos de consumo eléctrico y:

$$\boldsymbol{w = \Phi_{elec} \cdot t \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{bomba}} \qquad (1.4)$$

- La **PÉRDIDA DE CARGA**, $\boldsymbol{h_f}$**,** que experimenta un fluido circulando por una tubería es la pérdida de energía del fluido por fricción, en su movimiento, con la pared de la tubería. Se calcula en función de la *pérdida de carga unitaria*, ***j***, según:

$$\boldsymbol{h_f = j \cdot L_{TOTAL}} \qquad (1.5)$$

donde, ***j***, *pérdida de carga unitaria*, será función de variables dependientes:

- diámetro
- caudal
- régimen del movimiento (laminar o turbulento)
- rugosidad de la tubería o régimen hidráulico

para su determinación, se utilizan expresiones empíricas que varían según el fluido y sus condiciones de trabajo. Como nuestro interés está centrado en el agua y el aire en *régimen turbulento* utilizaremos la fórmula de Darcy-Weisbach aceptada, actualmente, como más conveniente:

$$j = f\,\frac{1}{D}\,\frac{\rho . v^2}{2}$$

- ***f,** es el **factor de fricción**, en él se incluye la influencia de la tubería y el régimen de movimiento. Será determinado en función de la relación entre la rugosidad absoluta del material y el diámetro de la tubería (ε/D) así como el número de Reynolds (Re).*
  - *La expresión más aceptada, actualmente, para su cálculo, es la de White – Colebrook,*

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{\varepsilon/D}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\,\sqrt{f}}\right)$$

  - Para el cálculo indirecto de ***f*** es prácticamente universal el uso del diagrama de Moody, ver en Apéndice.

Para el <u>*cálculo directo de **j***</u> es habitual el uso de nomogramas – ver los incluidos en los Apuntes de Instalaciones del profesor Rubio Requena- que combinan de forma gráfica los valores posibles que pueden tomar: ***v, D y Q*** para valores prefijados del factor de fricción, ***f,*** determinados éstos experimentalmente para cada fluido y régimen posible.

- Y donde $\mathbf{L_{TOTAL}}$ es la longitud total de tubería recorrida por el fluido; en ésta se incluyen: *la longitud de los tramos rectos, la longitud equivalente de cada accesorio de tubería* (codos, tes, contadores, filtros, válvulas,…) y *la longitud equivalente* de los equipos conectados en el sistema (bombas, calderas, intercambiadores,…)

En resumen, durante el curso, cuando apliquemos el Principio de la Conservación de la Energía, utilizaremos la expresión:

$$p_1 + z_1\gamma + \rho\frac{v_1^2}{2} + w = p_2 + z_2\gamma + \rho\frac{v_2^2}{2} + h_f \quad (1.6)$$

donde todos los términos son de lectura o medición directa a excepción de *w y h_f* que serán calculados según se ha indicado anteriormente.

Sin embargo, en edificación tiene gran interés expresar las energías -en diferentes puntos de una instalación- en términos de altura, *en metros de un fluido*.

Es muy claro de entender, por ejemplo, que para abastecer de agua fría un edificio tendremos que dar al agua, al menos, la energía necesaria para vencer la acción de la gravedad… también energía adicional para vencer el peso de la columna de agua que está ya en la tubería… y, sin duda, mayor energía cuanto más veloz queramos que salga el agua en los puntos de consumo. Por todo ello, muy frecuentemente, se utiliza la expresión:

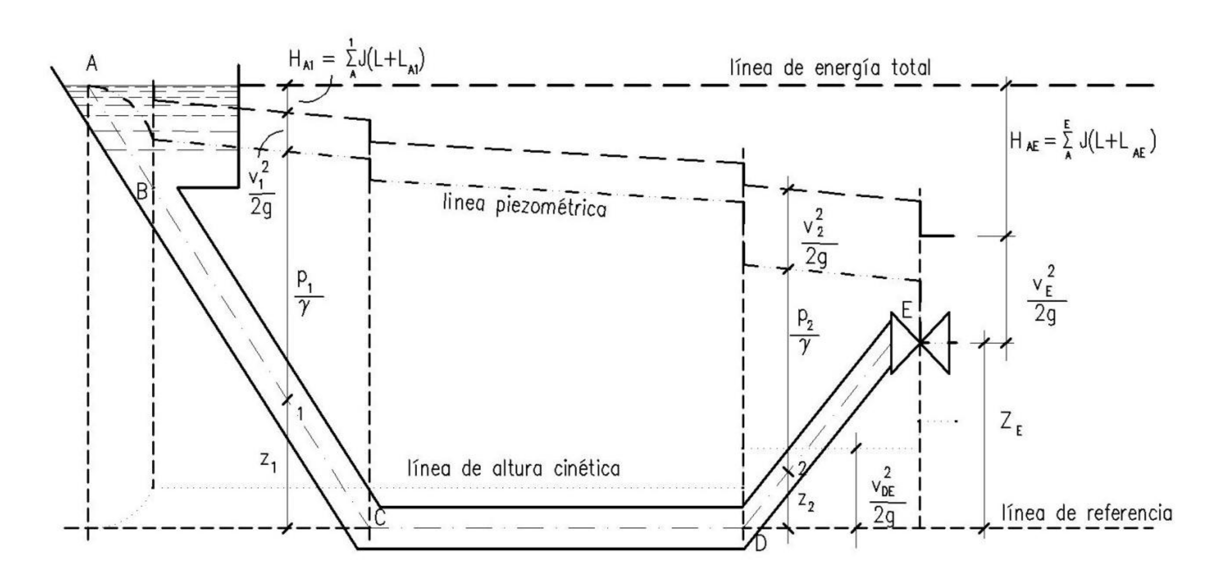
$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + w = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

que como antes veíamos se puede expresar en *m* si simplificamos matemáticamente la expresión *N.m/N*

1.3. Alturas de presión

Mediante el artificio de expresar la energía por unidad de peso N.m/N como una “altura en m” se utiliza la terminología de *alturas de presión***,** este concepto, nada ortodoxo, es sumamente práctico ya que nos permite expresar los términos de la ecuación de la energía en términos de alturas, en metros del fluido que estemos manejando; en edificación: el agua.

Consideraremos las alturas**: *de presión, geométrica, piezométrica y total***



Flujo estacionario de un fluido real

En el gráfico se considera que el fluido está en reposo en el punto A desde donde comienza a moverse hasta que en el punto B alcanza velocidad estacionaria. Está implícito que el depósito superior es tan grande que no se ve afectado por el fluido consumido.

- **Altura de presión, p/γ**, es la presión que se está ejerciendo sobre el fluido; en fluidos que se mueven por la simple acción gravitatoria es la altura de la columna de fluido sobre el punto.
- **Altura geométrica**, ***z***, es la altura que tiene el eje de la tubería con respecto a un nivel de referencia determinado como puede ser el nivel del mar. La altura geométrica se representa mediante la cota z. *Esta altura cuantifica la energía potencial.*
- **Altura piezométrica**, $p/\gamma + z$, es la suma de la altura geométrica y de la altura de presión. El lugar geométrico de las alturas piezométricas se determina uniendo en una línea la altura que en un fluido circulante alcanzan los distintos tubos piezométricos emplazados a lo largo de la tubería que se considera**.**
- **Alturas totales**, estas alturas se obtienen sumando a las alturas piezométricas, las alturas de la velocidad de circulación $(p/\gamma + z) + (v^2/2g)$.

2. MÁQUINAS DE FLUIDOS

Son dispositivos utilizados para transferir energía a los fluidos.

Bombas, ventiladores y compresores son dispositivos –máquinas- utilizados para transmitir energía a los fluidos; pero mientras que bombas y ventiladores -*máquinas hidráulicas o de fluidos incompresibles*- transfieren energía haciendo que varíe *la energía mecánica* del fluido, los compresores -*máquinas térmicas o de fluidos compresibles*- actúan aumentando su *energía mecánica y su energía térmica*; de forma muy genérica podemos decir que:

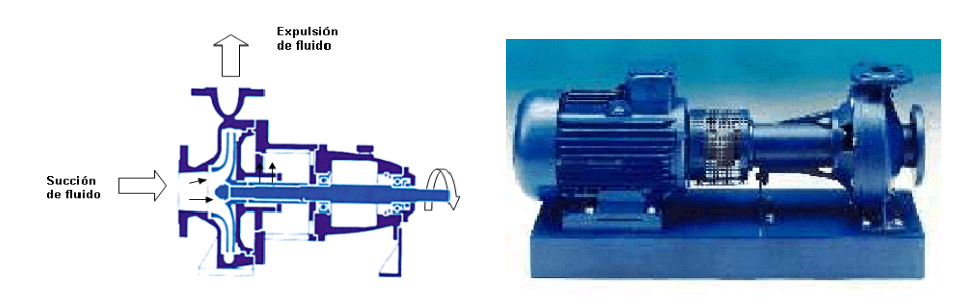
- Se utilizan *bombas* para mover fluidos incompresibles: *líquidos* y el peso de la columna de fluido que soporta la bomba (cuando hay diferencia de cota) es relevante.

- Se utilizan *ventiladores* cuando los fluidos desplazados son *gases* forzados a desplazarse a presiones menores de 20 kPa y velocidades inferiores a 50 m/s. A estas presiones y velocidades, gases como el aire se consideran incompresibles; y como su densidad es pequeña: el peso de la columna de aire que soporta el ventilador es irrelevante.

- Se utilizan *compresores* cuando el objetivo fundamental es *aumentar la presión* en un fluido, necesariamente compresible y por tanto: *gas*. En estos, el aumento de presión variará significativamente su energía interna y, en conjunto, su entalpía que se manifestará por un aumento de su temperatura.

2.1. Bombas

Es habitual, aunque inapropiado, utilizar el término de bomba para nombrar no solo al dispositivo sino también al conjunto formado por: la propia bomba, el motor eléctrico que la alimenta y los accesorios y elementos complementarios de acople y función.



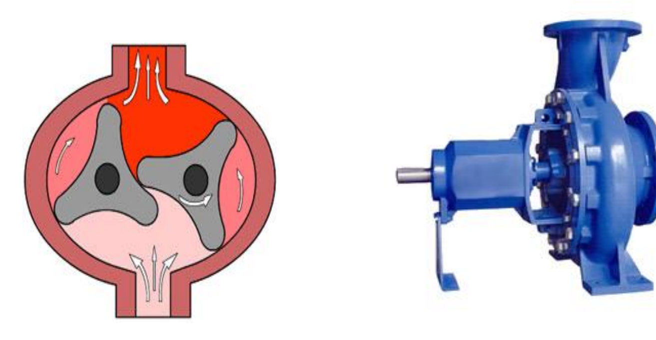
Bomba **Motobomba**

Todas las bombas que usamos en edificación llevan motor eléctrico, a excepción de aquellas que en prevención de un posible corte de suministro están movidas por motores de combustión interna, por ejemplo: las bombas del sistema de protección contra incendios.

2.1.1. Tipos de bombas

Al menos debemos distinguir dos tipos: **de desplazamiento positivo y cinéticas** ,

- *De desplazamiento positivo*: según la morfología del impulsor pueden ser *alternativas, rotatorias o de diafragma;* desplazan volúmenes iguales de fluido manteniendo un caudal constante escasamente afectado por la presión en el sistema. Funcionan con fluidos de todo tipo, recomendables para fluidos muy viscosos. Usados, por ejemplo, para probar a presión tuberías y recipientes; un ejemplo más sencillo son las bombas de bicicleta o una simple jeringuilla.



Bomba de desplazamiento positivo **Bomba centrífuga**

- *Cinéticas*: habitualmente de flujo radial, *centrífugas*, son las más utilizadas en las instalaciones de la edificación, capaces de transmitir elevada energía al fluido aunque el volumen desplazado es muy sensible a los cambios de presión en el sistema. De hecho, el caudal que puede manejar una bomba disminuye con el aumento de la presión en el sistema. Recomendables para fluidos con viscosidad próxima a la del agua $\nu \leq \nu_{agua}$ son de uso universal en instalaciones de suministro de agua.

2.1.2. Potencia, Φ, y rendimiento, η, de una bomba

Aquí debemos prestar especial atención en no confundir el todo con las partes: *bomba y motobomba*. Sin duda, es la bomba la que transmite energía al fluido pero la bomba es inerte, requiere de un motor que consumiendo energía eléctrica haga girar su rodete (*impeler*) para que éste impulse el fluido a través de las tuberías; el fluido al salir de la bomba habrá recibido una energía que utilizaremos para el fin propio perseguido; por ejemplo para vencer la fuerza de la gravedad al elevar agua potable hasta la última planta de un edificio.

Por tanto tendremos diferentes potencias según a qué elemento del conjunto prestemos atención:

- **Potencia consumida, Φ_C:** es la potencia eléctrica consumida *por el motor* durante el funcionamiento de la bomba, $\Phi_C = V \cdot I \cdot \cos\theta$
- **Potencia necesaria, Φ_N:** es la potencia que desarrolla *el eje y rodete* de la bomba, se calcula indirectamente mediante Φ_C *o* Φ_U
- **Potencia desarrollada o útil, Φ_U:** es la energía por unidad de tiempo que tiene *el fluido* a la salida de la bomba, $\Phi_U = Q \cdot \Delta P$

Es obvio que habrá pérdidas de energía durante el funcionamiento de la bomba -tanto pérdidas eléctricas como mecánicas- y se producirán en los dos dispositivos móviles: *el motor y la bomba*. El primero, sufrirá pérdidas por efecto Joule –calentamiento del bobinado al paso de la corriente eléctrica- y pérdidas por el rozamiento de sus elementos móviles y, el segundo, por rozamiento mecánico, en el acoplamiento y elementos móviles, y por rozamiento del fluido.

Necesariamente habrá diferencia entre la potencia teórica, máxima, que cada dispositivo puede desarrollar y la que, descontadas las pérdidas, realmente desarrolla; *se llama rendimiento, η, a la relación entre la potencia realmente transmitida y la potencia teorica,* así:

- ***Rendimiento de la bomba,*** $\eta_b = \Phi_U / \Phi_N$
- ***Rendimiento del motor,*** $\eta_m = \Phi_N / \Phi_C$

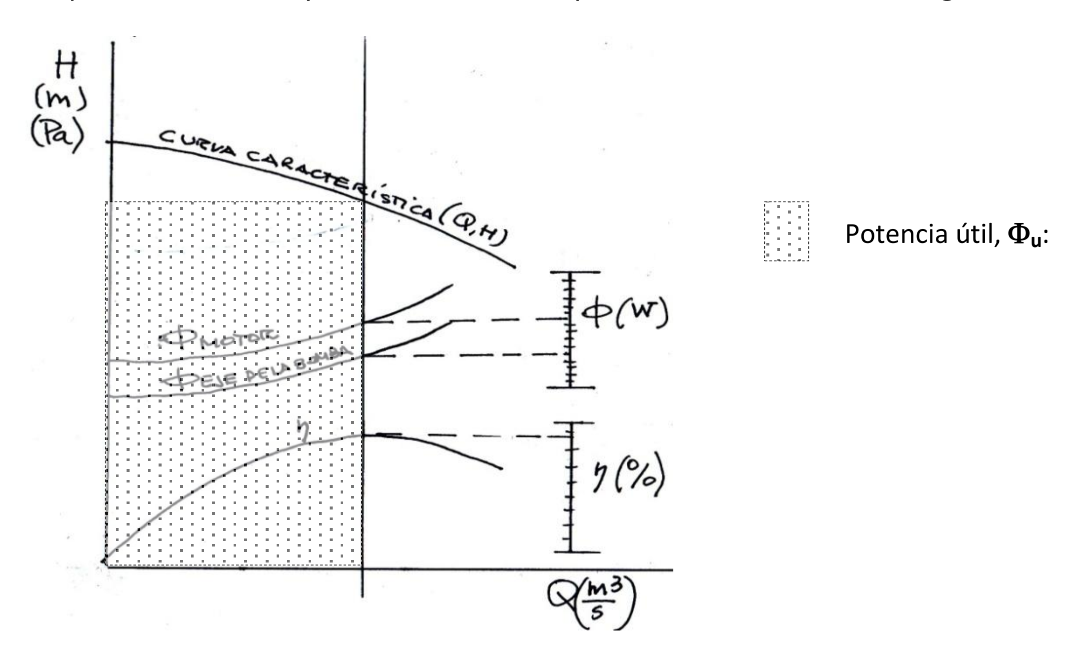
Los rendimientos son una característica que nos proporciona el fabricante y con ellos podremos determinar la potencia necesaria y elegir la bomba más adecuada,

$$\Phi_N = Q \cdot \Delta P / \eta_b \qquad \Phi_N = (V \cdot I \cdot \cos\theta) \cdot \eta_m$$

No debemos olvidar que las máquinas que se instalan son las motobombas ni que los fabricantes nos proporcionan, por separado, las características de los motores y de las bombas; y, de cada bomba, su comportamiento con impulsores de diferente diámetro. El rendimiento de una bomba es específico para cada composición.

2.1.3. Funcionamiento y caracterización de las bombas

Interesa conocer, fundamentalmente: *el caudal y la presión*. El caudal es la variable fundamental; las bombas responden a la necesidad de *mover fluidos* para que *salven una altura y/o lleguen con la energía*, presión, *que allí se requiera.* Caudal-presión son variables dependientes; si consideramos la variación de una de ellas, *necesariamente,* la otra variará según una relación que es específica para cada bomba: el funcionamiento de cada bomba es descrito por su ***curva característica*** que, proporcionada por el fabricante, nos muestra gráficamente los valores de *caudal* que maneja la bomba como abscisa; y, en ordenadas, se representa *la presión*. Potencia y rendimiento son representados en este mismo gráfico.



Potencias y rendimiento de una bomba

La escala del caudal, en abscisa, se mantiene, mientras que en ordenadas aparecen diferentes escalas en el mismo soporte: **H**, presión del fluido, **η**, rendimiento, potencia del motor, Φ_C y del eje de la bomba, Φ_N.

Recordando que la potencia útil de la bomba es el producto del caudal por la presión, observamos que la ***curva característica*** nos va dando el lugar geométrico de los puntos **(Q_i,H_i)** cuyo producto es la potencia útil transmitida al fluido.
La curva Φ_C nos indica la potencia consumida por el motor para mover el fluido y **η** el rendimiento de la bomba; se observa que la potencia útil (rectángulo punteado) es máxima en el punto donde el área bajo la curva **(Q,H)** es mayor.

Aunque la industria proporciona una gran variedad de tipos y tamaños de bombas sin duda las más versátiles y utilizadas son las *bombas centrífugas*. El gráfico anterior se refiere a este tipo de bombas, en general, los gráficos de curvas características de las bombas son similares aunque la curva característica adopta

formas diferentes según varíe el rodete y del motor. Cada bomba tiene un gráfico específico para cada:

- diámetro de rodete
- velocidad de giro, constante, del eje de la bomba

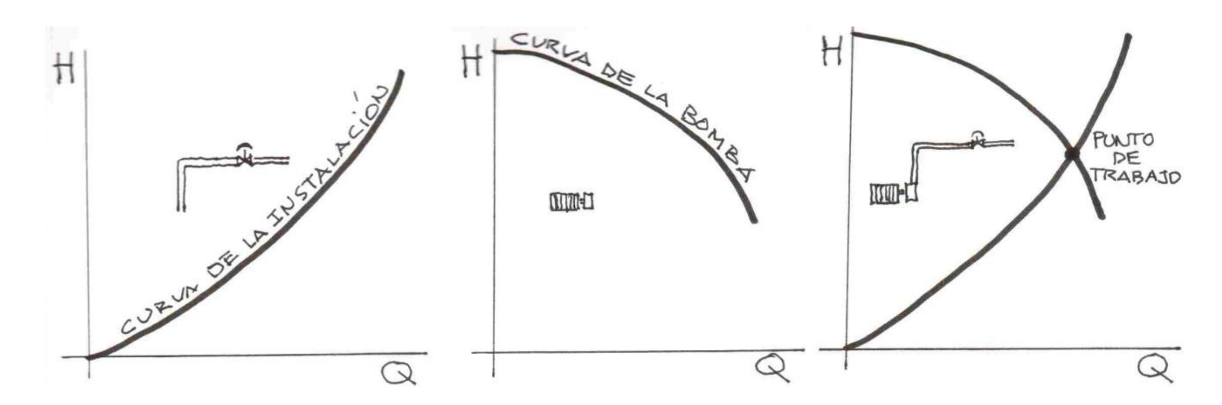
El catálogo del fabricante suele ofrecer familias de gráficos que describen el comportamiento de la misma bomba con distintos rodetes y distintos motores; de modo que, la misma motobomba, pueda ser adaptada para diferentes demandas de caudal y/o presión.

2.1.4. Selección de una bomba

De forma muy resumida podemos decir que la selección de una bomba se hace determinando *el punto coincidente de la curva característica (de potencia útil) de la bomba con la curva de pérdida de carga en la instalación*. Como la selección se hace siempre para un circuito previamente diseñado, conoceremos:

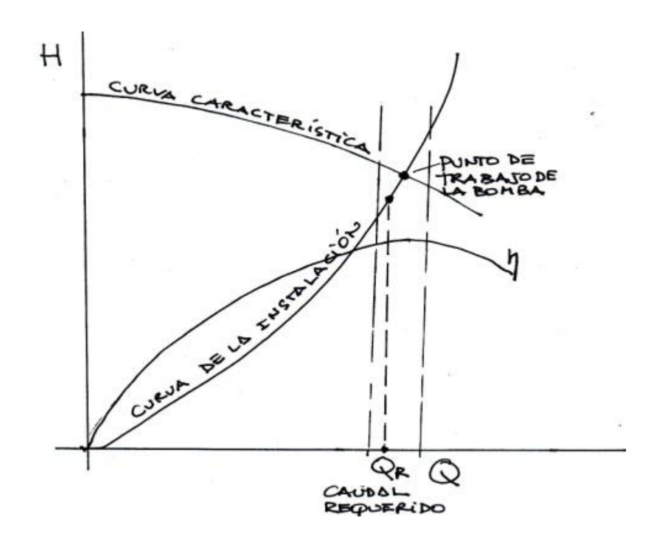
- El caudal del fluido que va circular
- El tipo de tubería elegido
- Las alturas de impulsión y succión que se deben vencer

Con ellos, primero, se representa una curva que muestra cómo aumentan las pérdidas de energía del fluido según aumenta el caudal circulante: ***curva de la instalación.*** Se elegirá entonces una bomba cuya *curva característica* corte a *la curva de la instalación* ***en*** un punto lo más próximo posible, y por encima, del caudal que ha de manejar la bomba. Y este será *el punto de trabajo de la bomba.*



Curvas características de la instalación y de la bomba

De la amplia gama de posibilidades disponibles, elegiremos aquella que presente un mejor rendimiento para el **caudal requerido** (*que el punto de caudal esté en la vertical del punto máximo de la curva de rendimiento*).



Punto de trabajo coincidente con máximo rendimiento

2.2. Ventiladores

Ventilador es una máquina rotativa que sirve para transportar gases; consta, en esencia, de un motor de accionamiento eléctrico, y un propulsor giratorio en contacto con el gas. El *propulsor* consume energía eléctrica y la transforma en *energía mecánica* que es transferida, como *presión,* al gas para mantener el flujo continuo.

Los ventiladores se distinguen de los turbocompresores y sopladores en que: *las variaciones de presión en el interior del ventilador son tan pequeñas que el gas se puede considerar prácticamente incompresible.*

Convencionalmente se fija el límite de incremento de presión, Δp_{total}, para ventiladores en 1 m.c.a. (10 kPa), o una relación de compresión, ε_c = 1,1. Se llaman sopladores o compresores a las máquinas que producen incrementos mayores a los anteriores de presión o compresión.

Se clasifican según la dirección de flujo en el rodete: ***axiales y centrífugos*** son los más comunes con una variada gama de formas intermedias.



Ventiladores centrífugos **Ventiladores axiales**

2.2.1. Curva característica, potencia y rendimiento

Es de aplicación todo lo referido, en las bombas, a estos conceptos. Y así:

- ✧ **Potencia consumida:** $\Phi_C = V \cdot I \cdot \cos\theta$
- ✧ **Potencia necesaria *(en el eje del rodete)*:** $\Phi_N = \dfrac{Q \cdot \Delta p}{\eta_V}$
- ✧ **Potencia útil:** $\Phi_U = Q \cdot \Delta p$
- ✧ **Rendimiento del ventilador, $\eta_v = \Phi_U / \Phi_N$**
- ✧ **Rendimiento del motor, $\eta_m = \Phi_N / \Phi_C$**

2.2.2. Flujo de aire en conductos: presión estática y presión dinámica

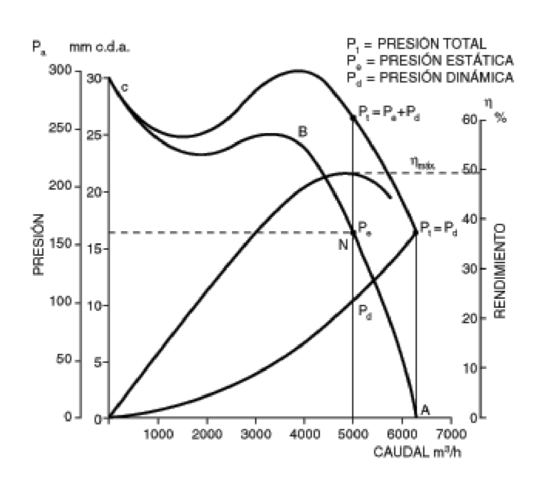
Al considerar *incompresible el aire* es de aplicación la ecuación de la conservación de la energía:

$$p_1 + z_1\gamma + \rho\frac{v_1^2}{2} + w = p_2 + z_2\gamma + \rho\frac{v_2^2}{2} + h_f$$

Aunque con una particularidad: *su peso específico*, γ, muy pequeño, permite despreciar el término de altura, $z\gamma$, respecto a los términos de presión y velocidad, en consecuencia:

$$p_1 + \rho\frac{v_1^2}{2} + w = p_2 + \rho\frac{v_2^2}{2} + h_f$$

la energía transmitida por un ventilador -*para hacer que un caudal de aire se traslade de un punto a otro*- se transforma en: incrementos de *la presión estática*, Δp, y de la *presión dinámica*, $\Delta\rho \frac{v^2}{2}$, que deben compensar las pérdidas por rozamiento en el conducto y mantener la velocidad/presión de salida requerida.

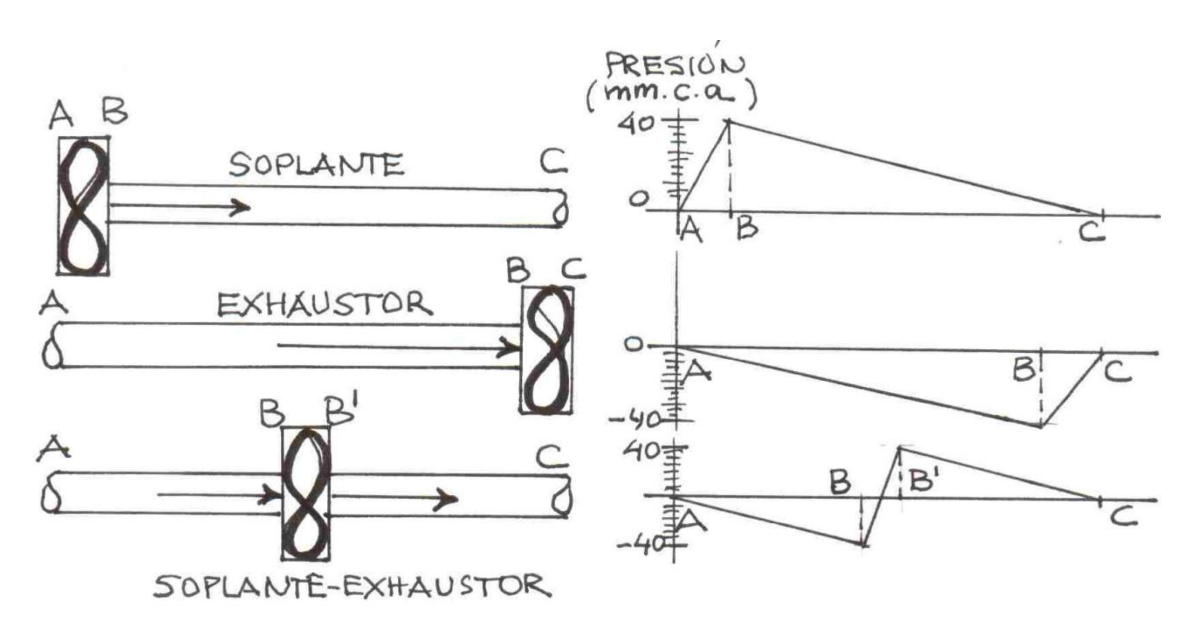


<u>Curva característica de un ventilador helicoidal:</u> la presión estática es máxima cuando el flujo está cerrado y mínima cuando funciona a pleno caudal; al fluir va aumentando su presión dinámica hasta que se hace máxima mientras que la estática disminuye hasta ser nula.
La presión total es, para todo caudal, la suma de ambas.

2.2.3. Extracción e impulsión

Será de la mayor importancia decidir cómo se ventila un local, si <u>impulsamos aire</u>: *sobrepresionando* el local; si <u>extraemos aire</u>: poniéndole en *depresión* o si <u>impulsamos y extraemos al mismo tiempo</u> manteniendo a presión atmosférica.

En el primer caso, el ventilador actúa como *soplante*, aspirando aire a la presión atmosférica y comprimiéndolo a mayor presión; en el segundo actúa como *exhaustor*, aspirando aire a una presión inferior a la atmosférica y comprimiéndole hasta una presión mayor o igual que la atmosférica; en el tercer caso *soplante-exhaustor* actúa como un recirculador de aire.



Extracción e impulsión en ventiladores

El caso más general de los representados en el dibujo es el de <u>*ventilador en medio*</u>, en esta instalación la energía aportada por el ventilador es función del incremento de presión total (estática más dinámica, $p + v^2/2g$) entre su entrada y salida, entre B y B', y se calcula aplicando la ecuación de la energía a lo largo de todo el trayecto, ABB'C, según:

1. Entre **A** y **B**:
   $\mathbf{p_{TotalA} = p_{TotalB} +} \boldsymbol{h_{fAB}}$,, $p_A + ½\, \rho v_A^2 = p_B + ½\, \rho v_B^2 + h_{fAB}$,, *como* p_A *y* $v_{A,} = 0$

   $$\Rightarrow \ \mathbf{p_B = -\,½\, \rho v_B^2 - h_{fAB}}$$

2. Entre **B' y C**:
   $\mathbf{p_{TotalB'} = p_{TotalC} +} \boldsymbol{h_{fB'C}}$,, $p_{B'} + ½\, \rho v_{B'}^2 = p_C + ½\, \rho v_C^2 + h_{fB'C}$,, con $p_C = 0$ y $v_C \neq 0$

   $$\Rightarrow \ \mathbf{p_{B'} = -½\, \rho v_{B'}^2 + ½\, \rho v_C^2 + h_{fB'C}}$$

3. Entre **B** y **B':**
   $\mathbf{p_{TB} + w = p_{TB'} +} \boldsymbol{h_{fBB'}} \Rightarrow w = (p_{TB'} - p_{TB}) + h_{fBB'} \Rightarrow w = (p_{B'} - p_B) + 1/2\ \rho(v_{B'}^2 - v_B^2) + h_{fBB'}$
   sustituyendo p_B y $p_{B'}$,, $w = 1/2\, \rho(v_B^2 - v_{B'}^2) + 1/2\, \rho(v_{B'}^2 - v_B^2) + 1/2\, \rho v_C^2 + h_{fB'C} + h_{fAB} + h_{fBB'}$

   $$\Rightarrow \ \mathbf{w = ½\, \rho v_C^2 + h_{fB'C} + h_{fAB} + h_{fBB'}}$$

Por el mismo procedimiento:

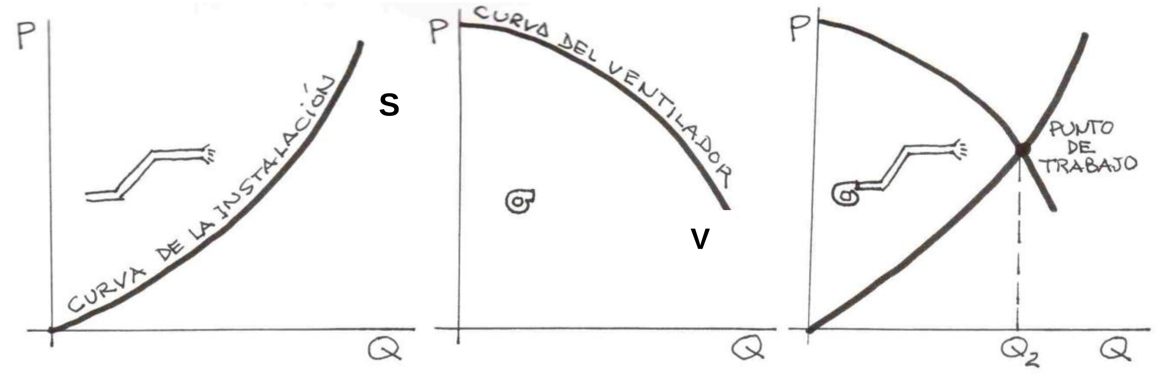
- *Con el ventilador en cabecera*, soplante: **w = ½ ρv_C^2 + h_{fAB} + h_{fBC}**
- *Con el ventilador en final,* exhaustor: **w = ½ ρv_C^2 + h_{fAB} + h_{fBC}**

Se observa que en las tres posiciones:

- *la energía que comunica el ventilador al fluido es la misma, actúe como actúe el ventilador, ya sea soplante, extractor o soplante-extractor*
- *y será la necesaria para vencer las pérdidas totales en el circuito más la presión dinámica en la salida*
- *aunque teóricamente no es necesario se debe de estimar una velocidad de salida exterior mayor que cero pues siempre se producirán presiones del viento que dificultaran el funcionamiento del ventilador*
- *como la presión estática en todo conducto de admisión al ventilador es negativa no se deben usar conductos de fibra, textil o baja resistencia mecánica en instalaciones de extracción: pueden colapsar*
- *la presión estática, en valor absoluto, es mayor en soplantes que en extractores; necesariamente las pérdidas por rozamiento son mayores en sobrepresión que en depresión*
- *la resistencia mecánica de los conductos debe ser mayor como soplante que como exhaustor aunque en ocasiones la falta de atención a la depresión puede provocar el colapso de los conductos*
- *y sin llegar al colapso la estanqueidad del conducto debe ser asegurada ya que siempre habrá mayor presión, en valor absoluto, de fugas que de infiltración*

2.2.4. Selección de ventiladores

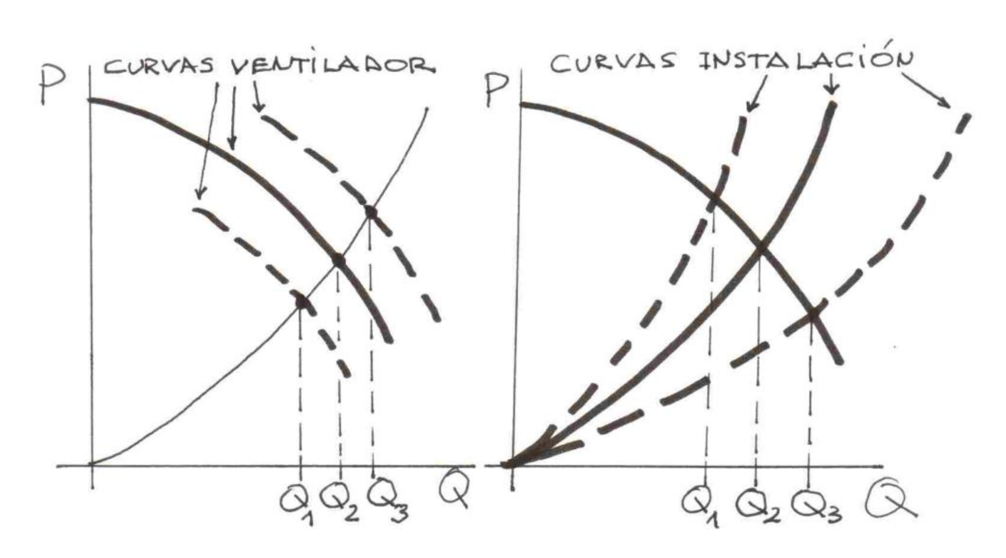
Como en el caso de las bombas los ventiladores se seleccionan para manejar un *caudal*, **Q,** al que aumentará su *energía*, **Δp**, en, al menos, cantidad suficiente para que venza las pérdidas de carga, por fricción, en los conductos. Manteniendo, durante la operación, un nivel sonoro, **Lw**, admisible.



Curvas características de la instalación y del ventilador

En la figura anterior se muestra la *curva característica*, **S,** de la instalación; la *curva característica*, **V,** del ventilador utilizado para manejar un caudal $\mathbf{Q_2}$ y el punto de trabajo del conjunto. Si $\mathbf{(Q_2, p_2)}$ es el punto de trabajo –condiciones de funcionamiento- elegido para la instalación y, posteriormente, se necesitara variar el caudal tendríamos dos posibilidades genéricas:

- cambiar el ventilador, **V**: aumentando o disminuyendo la presión que se traslada al fluido costoso económica y materialmente
- variar la instalación, **S**: aumentando o disminuyendo la pérdida de cara para el mismo recorrido

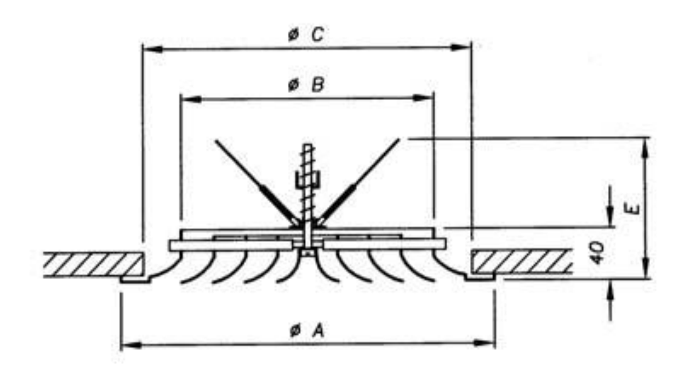


Alternativas a la variación de caudal en una instalación

Cambiar el ventilador, sea completo o algunas de sus partes –rodete o motor- es costoso económica y materialmente; cambiar la instalación sería aún más costoso si la alternativa fuese rediseñar, y sustituir, los conductos y difusores pero, realmente, sólo es necesario aumentar o disminuir la pérdida de carga total en el circuito y los aumentos y reducciones de las pérdidas de carga se pueden hacer variando la sección efectiva de las bocas de descarga de aire a los recintos. Por esta razón se deben elegir bocas de impulsión que tengan posibilidad de regular el caudal de paso y elegirlas de forma que el caudal de proyecto se pueda servir en la posición intermedia de este regulador.



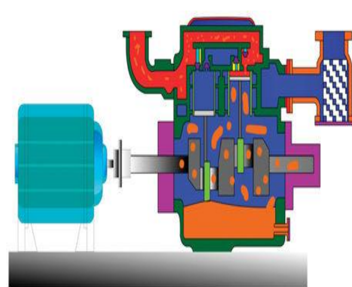
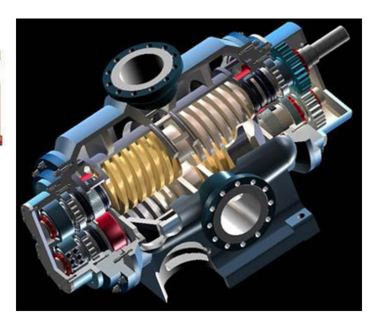
Boca de impulsión



Sección

2.3. Compresores

Los compresores son máquinas que se utilizan para comprimir gases y, en consecuencia, aumentar la energía interna del fluido y la presión estática del gas; son de gran importancia en la industria donde, por ejemplo, comprimiendo aire se dispone de un medio económico y ecológico para transportar energía, también, en la industria se utilizan compresores para, comprimiendo fluidos de alta viscosidad, conseguir grandes presiones con muy pequeño cambio de volumen lo que les hace especialmente útiles para ejercer enormes fuerzas con pequeños dispositivos: oleohidraúlica, sin embargo, en edificación, en sus instalaciones, los compresores más frecuentes y de mayor interés son los que trabajan con *gases capaces de cambiar de fase a temperatura y presión próximas a las condiciones atmosféricas*; compresores que son componentes fundamentales de las máquinas frigoríficas.

Compresores: helicoidal, reciprocante y tornillo

Los tipos más frecuentes de compresores son los:

ROTATORIOS

- lóbulos
- paletas
- tornillo

ALTERNATIVOS

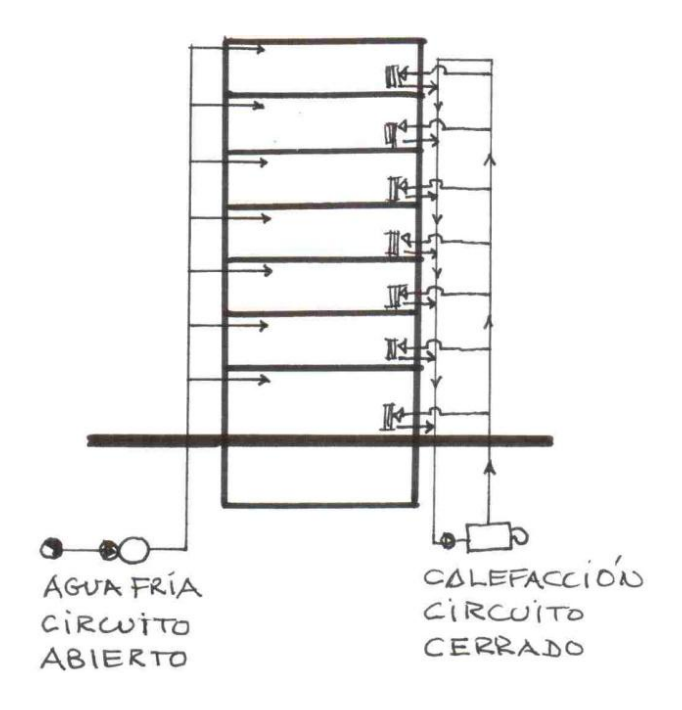
- de pistones
- de cilindros

2.3.1. **Compresores VRV** (Volumen de Refrigerante Variable)

Los compresores están normalmente diseñados para trabajar a demanda constante, bien porque están ajustados al consumo o porque, más habitual, tienen un depósito de acumulación. Sin embargo los compresores de refrigerante deben responder a continuas variaciones de demanda, para atenderlas se fabrican desde los años setenta compresores que permite modular el caudal comprimido atendiendo, simétricamente, la demanda variable. Esto, habitualmente llamado, tecnología *INVERTER* no es más que la aplicación de un variador de frecuencia al motor del compresor que permita variar su potencia en función de la demanda real de refrigerante en los puntos de consumo.

3. CIRCUITOS HIDRÁULICOS

El consumo de materia o energía que requiere el funcionamiento de los edificios hace necesario construir sistemas complejos de conductos, dispositivos, elementos de control y accesorios que permitan el traslado de aquéllas desde los centros de producción a los puntos de consumo. El conjunto de todos estos elementos se llama: **circuito.**



Los circuitos pueden ser <u>*cerrados o abiertos*</u>, los circuitos abiertos implican consumo de fluido: *entra y sale al circuito una masa determinada de fluido;* en los circuitos cerrados*:* <u>no</u>, en estos, *la masa total de fluido se mantiene constante.*

Los circuitos hidráulicos nunca son simples, cualquiera de las instalaciones –agua fría, calefacción, agua caliente sanitaría,…- podemos considerarla como un conjunto de circuitos, de tamaño decreciente, integrados, donde debemos conseguir que *por cada circuito y por cada ramal o bifurcación circule el caudal previsto con la presión requerida.*

En los *circuitos abiertos* se determina *el diámetro de las conducciones* para que *el caudal y la presión*, <u>en cada ramal</u>, sea la correcta al uso y a la normativa; esto es, estarán –caudal y presión- dentro de ciertos límites establecidos por la normativa; aunque su disponibilidad será variable con el uso. Como ejemplo sirva la instalación de agua fría que será calculada para que la presión en los puntos de consumo no baje de 100 kPa ni sea mayor de 500 kPa pero permite que el caudal y la presión en cada punto varíen dentro de los límites -100 y 500 kPa- según la cantidad de puntos que estén en uso o servicio.

Los *circuitos cerrados* se diseñan, sin embargo, para que se mantenga estacionario el caudal y la presión en cada ramal o bifurcación del circuito de acuerdo a las previsiones de proyecto.

3.1. Elementos de un circuito

- **Tuberías** son superficies cilíndricas, prismáticas en conductos de aire, abiertas en sus extremos.

  En la mayor parte de las instalaciones industriales los parámetros relevantes en la elección de una tubería son: *el caudal circulante, la presión del fluido sobre la pared y la reactividad química del fluido*. En edificación se cuenta con la ventaja de que las presiones, caudales y reactividad química tienen reducidos valores sobre los estándares comerciales**.** Esto es, contamos con una amplia gama de tuberías, disponibles comercialmente, para cada requerimiento de proyecto; nuestra preocupación *nunca será buscar sino elegir.*

  Nuestro interés no estará centrado en *buscar* una tubería que sea capaz de permitir el *caudal calculado sin problemas de rotura por presión* -seguro que dispondremos de alternativas- sino elegir el diámetro que permita una velocidad que *no produzca ruidos* en la circulación; tampoco nuestro problema será el espesor de pared de la tubería sino el aislamiento y recubrimiento exterior para su protección térmica, acústica y a la agresión química y/o mecánica exterior.

  Por esta razón se utilizan numerosas tablas, ábacos y nomogramas; con ellos limitamos los valores de uso sobre los posibles, primando siempre el criterio de bienestar del usuario y largos periodos en la vida útil de las instalaciones.

  Tuberías y conductos de uso habitual en construcción son:

  - Metálicas: acero al carbono, inox, galvanizado; cobre,..
  - Plásticas: PVC,PEX (X: reticulado) PEAD, CPP
  - Ductos de chapa metálica
  - Multicapa: PEADX/AL/ PEADX
  - Hidráulicas: hormigón reticulado, fibrocemento
  - Ductos de fibra de vidrio

- **Válvulas y accesorios** son los dispositivos que permiten abrir, cerrar o regular el paso de los fluidos que circulan por tuberías; sirven para controlar la presión, el caudal y la dirección de flujo; los accesorios son partes específicas de la tubería o elementos que no condicionan la circulación del fluido

  - Mariposa
  - Compuerta
  - Retención
  - Seguridad
  - Purga
  - Bola
  - Filtros
  - Codos, tés, reducciones

- **Recipientes y equipos:** por reducida que sea la instalación siempre contará con elementos de acumulación o variación de volumen del fluido, así como equipos que ayudan a mantener o transferir su condición:
  - Depósitos
  - Vasos de expansión
  - Filtros
  - Intercambiadores

- **Máquinas:** la condición intrínseca a un circuito es su movimiento, traslado de materia o energía de un punto a otro del espacio y, para esto, se requieren:
  - Bombas
  - Ventiladores
  - Compresores
  - Calderas

Todos estos elementos son utilizados por la industria, en general, según los objetivos que cada actividad persigue y así, por ejemplo, una bomba para la industria petroquímica no debe cumplir los mismos requisitos, ni será caracterizada en la misma forma, que una bomba de regadío en una explotación agraria. En consecuencia, siempre debemos tener presente cuál es nuestro interés: la industria de la construcción**;** y de acuerdo a él entender cuáles son las características relevantes de cada elemento y los intervalos de variación admisibles en sus parámetros característicos para proceder a una elección correcta.

3.2. Especificaciones básicas de los elementos del circuito

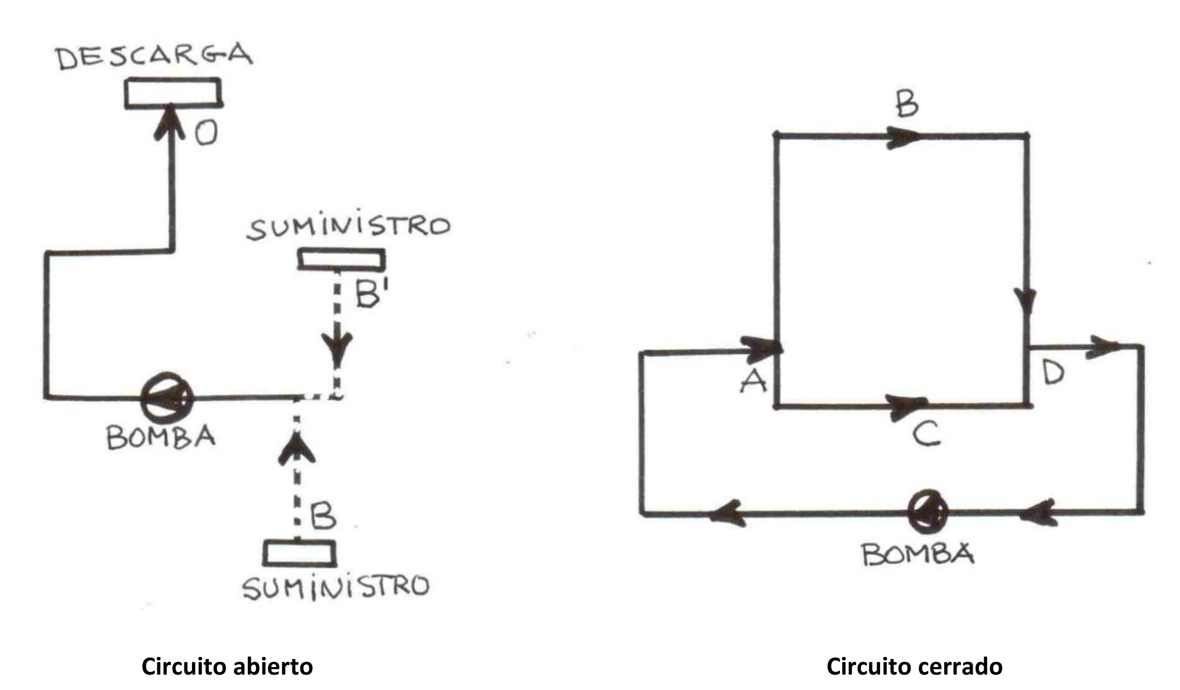
- **Material con el que está construido**: debe de tener la resistencia mecánica y química adecuada al flujo del fluido previsto.
- **Diámetro nominal:** acorde/adecuado a **l***a velocidad máxima permitida o recomendada* para cada instalación y fluido.
  La velocidad máxima puede estar limitada por distintas razones, las más frecuentes son *acústicas* y de *eficiencia en transferencia de energía*, <u>cuanto menor sea la velocidad</u>, dentro de ciertos límites<u> ,menor será el ruido producido por el movimiento del fluido y mayor la transferencia de energía.</u>
  La industria tiene normalizados los *espesores* que corresponden a cada diámetro para que soporte las presiones de trabajo máximas que establece la normativa, por lo que no será necesaria su especificación salvo en caso de diseños especiales o usos de tuberías para usos no recomendados.
  Es importante recordar que el diámetro nominal, **DN,** de una tubería corresponde al *diámetro interior* cuando están fabricadas en <u>acero, fundición de hierro o materiales hidráulicos</u> y corresponden con el *diámetro exterior* para las tuberías <u>plásticas o de cobre.</u>
- **Longitud equivalente:** todas las válvulas, accesorios, equipos o elementos en un circuito oponen una resistencia al flujo: equivalente a una longitud de tubería

recta del mismo diámetro. Esta longitud equivalente la determina y comunica el fabricante.

- **Protección:** todo circuito debe ser protegido exteriormente, al menos, contra la acción del ambiente exterior y, muy frecuentemente, acústica y térmicamente. En edificación la normativa nos ofrece los intervalos de valores permitidos y espesores según el material aislante.
- **Conductos:** para el flujo de aire: este tipo de conducciones, en chapa o fibra, suelen fabricarse en sección cuadrada; es recomendable usar una relación **½ a ≤ b ≤ ⅔ a** entre el lado mayor, **a,** y el lado menor, **b**. Razonablemente, salvo casos excepcionales, el lado mayor es paralelo a forjados; el menor coincide con el descuelgue mínimo de cualquier falso techo.
- **Máquinas:** las características fundamentales de estos elementos son su potencia y rendimiento.
- **Recipientes:** son elementos que se deben caracterizar en sí mismos y no sólo en función del circuito, su característica fundamental es el intervalo de presiones entre las que trabaja.

3.3. Energía de flujo y equilibrado de circuitos hidráulicos

La energía necesaria para trasladar un fluido de un punto a otro de un circuito depende de si es: abierto o cerrado. La energía necesaria para trasladar una unidad de peso <u>es significativamente mayor en un circuito abierto que uno cerrado.</u>



Circuito abierto **Circuito cerrado**

De acuerdo con la ecuación de conservación de la energía, el flujo, *entre dos puntos de un circuito,* de un fluido real en régimen estacionario debe cumplir *(1.6).*

En *circuito abierto* la energía total necesaria aumenta con la distancia entre los puntos, obviamente será máxima entre los puntos de entrada y salida al circuito

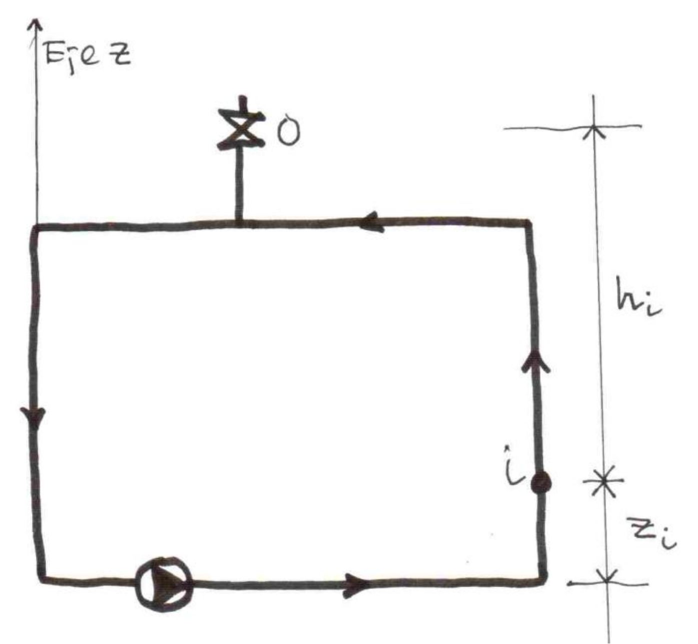
- $\Delta E_T = \Delta p + \frac{1}{2}\rho\Delta v^2 + \gamma\Delta z + h_f$

En *circuito cerrado* la energía total para desplazar el fluido entre dos puntos será:

- $\Delta E_T = \underbrace{\Delta p + \gamma\Delta z}_{0} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho\Delta v^2}_{0} + h_f$

En los circuitos cerrados tanto la altura, o presión, piezométrica como la altura, o presión, dinámica son iguales en todos los puntos:

- La presión dinámica debe de ser igual porque, en caso contrario, el fluido se aceleraría o frenaría continuamente en contra de la hipótesis de flujo estacionario.
- En el caso de la presión piezométrica porque la suma de las presiones estáticas y de flujo en cualquier punto es constante como se visualiza en el dibujo.



En un circuito cerrado todos los puntos tienen <u>*la misma energía*</u> aunque <u>*distinta presión.*</u>

Si se llena el circuito, a través de la válvula, con agua hasta rebosar:

1. Al cerrarla, la presión en O será igual a la atmosférica
2. La presión en cualquier punto será: $p_i = p_o + \rho.g.h_i$ *(variable con* h_i*)*
3. La energía por unidad de volumen será idéntica en todos los puntos:
   $p_i = p_o + \rho.g.z_i + \rho.g._i$
   $p_i = p_o + \rho.g.(z_i + h_i) = p_o + \rho.g.z_o$

<u>En consecuencia, en *circuitos cerrados:* $\Delta E_T = h_f$</u>

3.4. Equilibrado en ramales de circuitos cerrados

En los circuitos que contienen ramales paralelos -que tienen un origen común y terminan en otro, también común- el fluido debe dividir su caudal al llegar al punto de bifurcación para, de nuevo, unirse y reunir el caudal original en el punto terminal.

Es de interés saber qué cantidad de fluido va a circular por cada una de las ramas, porque este tipo de disposición lo vamos a encontrar, entre otros, en todos los dispositivos de emisión de energía de las instalaciones de climatización. Aunque como las instalaciones son reales y no retóricas: no tiene interés saber… tiene interés asegurarnos que por cada ramal va a ir el caudal que *necesariamente* debe ir. Esto es, debemos asegurarnos que **por cada ramal circula el caudal proyectado**, manteniendo la caída de presión entre los puntos de inicio y final.

Equilibrar una instalación es tomar todas las acciones necesarias sobre los circuitos que la componen para que, durante su funcionamiento, se mantengan por cada ramal los flujos de caudal proyectado a las presiones previstas.

Si tenemos un sistema con **n** ramales entre los puntos A y B debe cumplirse que

$$h_{fA\text{-}B} = h_{f1} = h_{f2} = \ldots = h_{fn}$$

ya que, cualquiera sea la trayectoria que siga el fluido entre A y B:

- salvarán la misma diferencia de cota
- variará por igual su velocidad
- sufrirán una caída de presión idéntica.

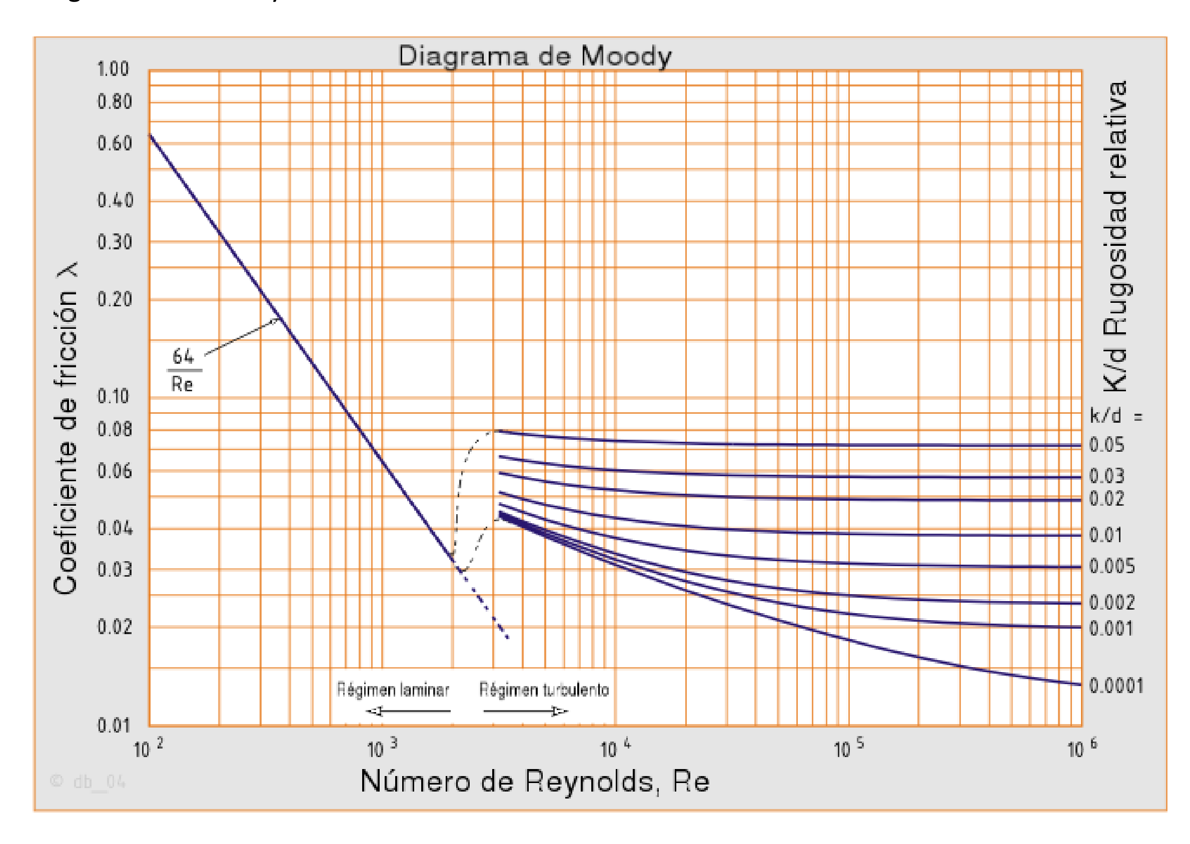
Para que se cumpla la anterior igualdad debemos igualar todas las pérdidas de carga a la mayor; esto implica que: ***la acción de equilibrar un circuito consiste en introducir, en los ramales paralelos, elementos que produzcan pérdida de carga hasta que se igualen a la del trayecto más desfavorable.***

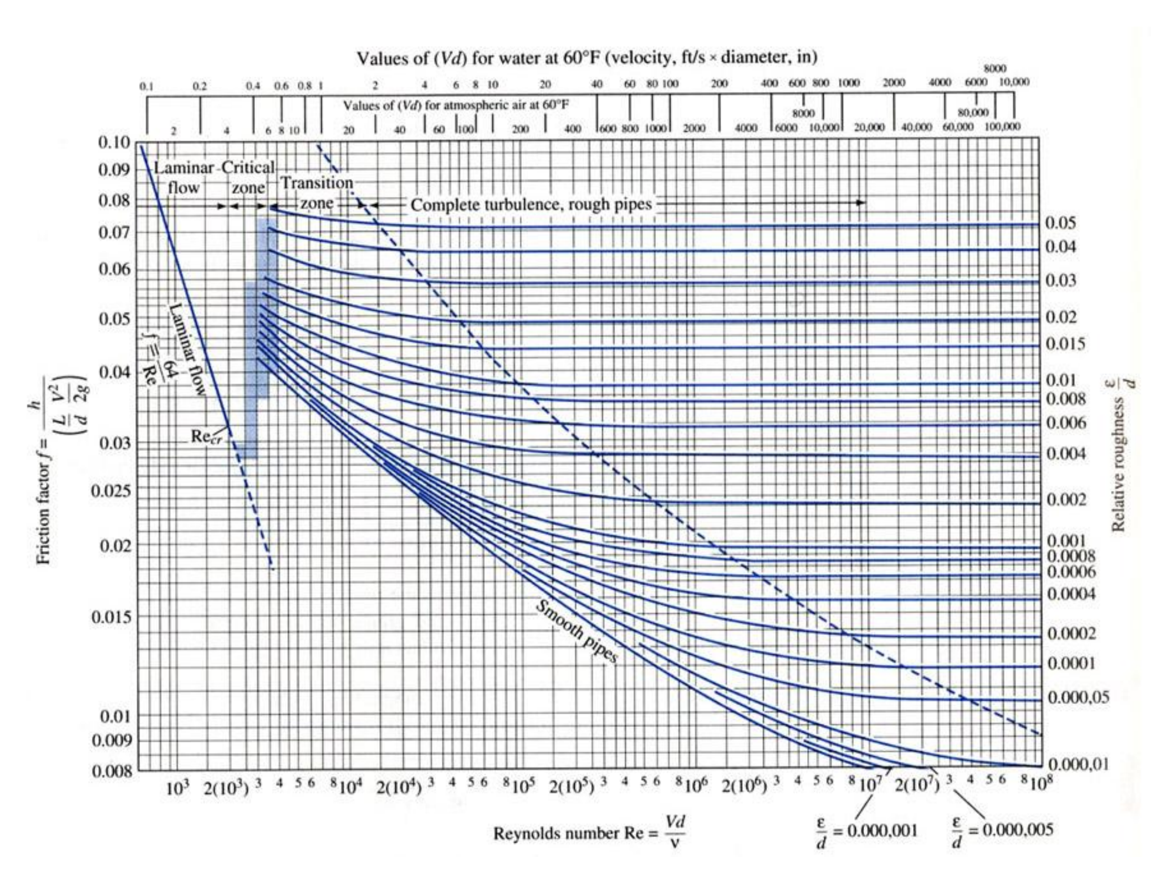
El equilibrado es muy importante en circuitos aparentemente abiertos como lo son las *instalaciones de difusión de aire climatizado*. En estos circuitos los difusores están equipados con elementos de apertura-cierre que permiten variar la sección útil de la boca de impulsión; podremos así variar caudal a la vez que aumentamos o disminuimos la perdida de carga total.

Es posible, también, en estos circuitos, utilizar compuertas en conductos que cumplen la misma función.

APÉNDICE

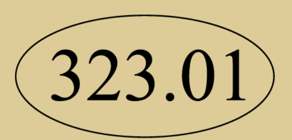
Diagramas de Moody





NOTAS

CUADERNO



Cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

